Ferdowsi Civil Engineering, 38, 1, 2025. (83-100)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Experimental Study of the Correlation between Resilient Modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil

Research Article

Siamak Shafaghatian[1], Gholam Moradi[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.83919.1248

1- Introduction

According to AASHTO recommendations, the resilient modulus (MR) is one of the fundamental parameters for designing pavement layers and determining their thickness. MR represents the elastic modulus of soil, calculated based on reversible strains under dynamic loads and varying stress states. Analyzing MR variations is one of the most effective methods for evaluating the performance of stabilized pavement layers.

Recently, to conserve resources, the use of innovative materials (rather than traditional ones) for soil stabilization has become widespread. These materials include enzymes**,** polymers, sulfates, ions, resins, oils, and others, which effectively mitigate risks associated with soil stabilization. Furthermore, in line with environmental concerns and the Kyoto Protocol's recommendations, biological stabilization methods—such as the use of biopolymers—have been introduced. Biopolymers offer advantages like simplicity, cost-effectiveness (requiring no specialized equipment), short mixing times, and high efficiency, particularly in clay soils.

Determining MR through laboratory testing is time-consuming and expensive. As per AASHTO guidelines, MR can instead be estimated using validated correlations with other soil parameters, such as the California Bearing Ratio (CBR) and uniaxial compressive strength (qu)**.** However, the applicability of these correlations must be verified for each specific scenario.

In this study, the focus is on subgrade clay soil**.** For stabilization, Nicoflok solid polymer (chemical method) and Beta-glucan biopolymer (biological method) were employed. Through laboratory experiments, their effects on qu and MR were investigated. Subsequently, the accuracy of the Thomson correlation for stabilized soils with these additives was analyzed.

2- Materials and Tests

In the present study, soil samples were collected from the subgrade of Amol-Sari Freeway in Mazandaran province. Based on the gradation, hydrometer analysis, and Atterberg limit tests, the soil is classified as high-plasticity clay (CH) under the Unified Soil Classification System (USCS).

Beta-glucan solution as a biopolymer and Nicoflok powder as a solid polymer were used for biological and chemical stabilization respectively. Beta-glucans comprise of D-Glucose monomers and have glycosidic bonds found in various forms such as cells, bran, fungi and bacteria in nature.

To examine the effect of stabilization, compaction tests (ASTM D698), unconfined compressive strength tests (ASTM D2166), and resilient modulus tests (AASHTO T307) were conducted.

3- Test Results

In general, stabilizing clay with calcium-based cations such as Nicoflok and cement resulted in a decrease in maximum dry density and an increase in optimum moisture content due to the accumulation of particles in larger spaces, low cation density and pozzolanic reaction. However, this trend stopped with the addition of Nicoflok to the highest value and the optimum moisture content decreased to some extent, which can be due to an increased effect of the hydrophobic properties of Nicoflok particles. Beta-glucan is a water-absorbing polymer with a density less than soil; therefore, the accumulation of low-density Beta-glucan fibers increased the optimum moisture content and decreased the maximum soil density. The optimum moisture content increased with the increase in the concentration of Beta-glucan.

The unconfined compressive strength test results are shown in Table 1.

*Manuscript received August 13, 2023, Revised November 18, 2023, Accepted December 24, 2024.

[1] Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil engineering, Khodabandeh Branch, Islamic Azad University, Khodabandeh, Iran**. Email:** shafaghatian@tabrizu.ac.ir

[2] Associate Professor, Department of Civil engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran**.**

Table1- Unconfined compressive strength test results

		Chemical			Biological		
		0.3 %	0.7 %	1 %	2 g/lit	4 g/lit	8 g/lit
3 Days	E_{sec}	129.7	144.14	131.46	121.8	182.42	150.41
	q_u	1.92	3.33	3.15	2.73	3.34	3.5
7 Days	E_{sec}	199.27	144.8	202.58	205.6	244.65	241.05
	q_u	2.32	3.62	4.32	4.56	5.02	4.32
14 Days	E_{sec}	196.67	149.21	200.57	207.58	254.5	252.04
	q_u	2.96	4.07	4.61	5.05	5.46	4.21
28 Days	E_{sec}	197.62	160.04	202.6	208.42	250.1	248.8
	q_u	3.43	4.31	4.94	5.48	5.6	4.2

Chemical stabilization using Nicoflok increased the resilient modulus. This trend proceeded with the increase in Nicoflok percentage and its effect on improving cementing performance and particle bonding. The increasing rate of M_R was more evident in the first 14 days of curing. The highest amount of M_R was 358 MPa achieved at an additive value of 1% and a curing period of 28 days.

In the biological stabilization, M_R increased up to a concentration of 4 gr/L and after that it did not change much until a concentration of 8 gr/L and even decreased from day 14. At a concentration of 8 gr/L fungus and erosion were observed on the samples, which could have been caused by the increase of uncombined Beta-glucan fiber colonies with clay partilces at this concentration in the stabilized soil structure.

4- Assessing the accuracy of Thomson's model in estimating M_R of the studied soil

Equation 1 states the Thomson model:

$$M_R = a.q_u + b \tag{1}$$

In which a and b are constants. In this model, M_R is linearly correlated with q_u. To evaluate this relationship in different stress states (different test sequences), the data of two curing periods of 14 and 28 days in three doses of Nicoflok and Beta-glucan was considered.

5- Conclusion

1. Density and Optimum Moisture Content Changes

Chemical and biological stabilization of clay **reduce** density and **increase** optimum moisture content. This trend occurs due to:

- Pozzolanic reactions in chemical stabilization,
- Accumulation of lightweight fibers in the soil structure in biological stabilization.

In chemical stabilization, when Nicoflok content increases to **1%**, the optimum moisture content decreases again due to the polymer's hydrophobic properties**,** while maximum dry density increases**.**

2. Compressive Strength and Elastic Modulus

Both Nicoflok and Beta-glucan enhance compressive strength and modulus of elasticity. However, the trends differ:

- Chemical stabilization (Nicoflok): Rapid strength gain occurs within the first 7 days, then slows.
- Biological stabilization (Beta-glucan): The optimal concentration is 4 g/L. At 8 g/L, strength and stiffness decline after 7 days due to excessive unbound fiber colonies (visible as fungal growth and surface erosion).

3. Resilient Modulus (MR) Behavior

- Nicoflok increases MR more significantly than Beta-glucan, especially during the initial 14-day curing period**,** with slower progress afterward.
- At 8 g/L Beta-glucan, MR decreases after 14 days.

4. Thomson Model Accuracy

- The Thomson model reliably estimates MR for Nicoflok-stabilized clay, particularly under serviceability stress conditions typical for highways (Fig. 1).
- Its accuracy is lower for Beta-glucan-stabilized soil**.**

مهندسی عمران فردوسی،۳۸، ۱، ۱۴۰۴. (۱۰۰-۷۳)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

بررسی آزمایشگاهی همبستگی مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک‌محوری در تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس بستر راه*

مقاله پژوهشی

سیامک شفقتیان[(۱)] غلام مرادی[(۲)]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.83919.1248

چکیده *با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن آزمایش، برای تعیین مدول برجهندگی (M_R) در اهداف طراحی، استفاده از روابط معتبر همبستگی با پارامترهای معمول خاک، مفید و رایج می‌باشد که اعتبار این روابط در خاک‌های تثبیت شده، کمتر بررسی شده است. تثبیت خاک ضعیف بستر راه، یکی از روش‌های پرهیز از هزینه‌های مالی و زمانی روش جایگزینی می‌باشد. طبق توصیه پیمان زیست‌محیطی کیوتو، تحقیق بر روی استفاده از مصالح نوین مانند پلیمرها و روش‌های نوین مانند تثبیت زیستی با اهداف ژئوتکنیکی مانند راهسازی گسترش یافته است. در این پژوهش تأثیر تثبیت شیمیایی و زیستی بر مقاومت فشاری تک‌محوری (q_u) و M_R و دقت مدل تامسون در همبستگی این دو پارامتر در خاک رس بستر مورد مطالعه، بررسی شد. در تثبیت شیمیایی از یک پلیمر جامد به نام نیکوفلاک و در تثبیت زیستی از یک بیوپلیمر به نام بتاگلوکان استفاده شد. هر دو مثبت، وزن مخصوص خشک خاک را کاهش و رطوبت بهینه و همچنین q_u آن را افزایش می‌دهند. برخلاف نتایج نزدیک در آزمایش q_u، پلیمر جامد، M_R خاک تثبیت شده را بیش از بیوپلیمر افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل پراکندگی داده‌های آزمایش، مدل تامسون برای تخمین M_R بر حسب q_u، در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب بوده و در خاک تثبیت شده با بتاگلوکان از دقت کافی برخوردار نیست.*

واژه‌های کلیدی مدول برجهندگی(M_R)، مدل تامسون، تثبیت شیمیایی و زیستی بستر رسی، نیکوفلاک، بتاگلوکان.

Experimental Study of the Correlation between Resilient modulus and Uniaxial Compressive Strength in Chemical and Biological Stabilization of Clay Subgrade Soil

Siamak Shafaghatian, Gholam Moradi

Abstract *Due to the high cost and time-consuming nature of testing, it is useful and common to use valid correlation relationships with common soil parameters to determine the resilient modulus (M_R) for design purposes. However, the validity of these relationships for stabilized soils has been less investigated. Stabilization of weak subgrade soil is a method of avoiding weak soil replacement costly and time-consuming problems. According to the Kyoto Protocol, a lot of research has been done on novel materials such as polymers and new methods like biological stabilization. This study aimed to investigate the effect of chemical and biological stabilization of clay subgrade soil on the resilient modulus and uniaxial compressive strength (q_u) and accuracy of the Thompson model for correlation between these two parameters. For chemical stabilization, a solid polymer called Nicoflok and for biological stabilization, a biopolymer solution called Beta-glucan were employed. In both methods, the dry unit weight of the soil decreased and its optimum water content and q_u increased. Despite similar results in the uniaxial test, the solid polymer increased the M_R of the stabilized soil more than the biopolymer. Based on the regression analysis of tests data, the Thompson model had more accurate results in the Nicoflock stabilized soil than the biopolymer ones.*

Key Words Resilient modulus (M_R), The Thompson model, Chemical and biological stabilization of clay subgrade soil, Nicoflock, Betaglucan.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۰/۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خدابنده، خدابنده، ایران،

(۲) دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،

Email: shafaghatian@tabrizu.ac.ir

مقدمه

طبق توصیه آشتو، مدول برجهندگی (Resilient Modulus (MR) یکی از پارامترهای اساسی به منظور طراحی و تعیین ضخامت لایه‌های روسازی آسفالتی می‌باشد [1] و [2]. MR، مدول الاستیک خاک بر اساس کرنش‌های برگشت‌پذیر، در حالت‌های مختلف تنش و تحت بارهای دینامیکی می‌باشد [3]. بررسی تغییرات MR یکی از مؤثرترین روش‌های ارزیابی نتایج تثبیت خاک لایه‌های روسازی می‌باشد. بنابراین در تحقیقات گوناگون به منظور بررسی تأثیر تثبیت با مصالح سنتی مانند آهک، سیمان، خاکستر بادی، سرباره‌ها و... به خصوص در خاک بستر، از آن استفاده شده است [4] و [5] و [6] و [7]. اخیرا به منظور کاهش فشار بر منابع، استفاده از مصالح نوین به جای مصالح سنتی برای تثبیت خاک مطرح شده و گسترش یافته است [8]. این مصالح به دسته‌های کلی پلیمرها، یون‌ها، آنزیم‌ها، سولفات‌ها، رزین و نفت و چند شاخه فرعی دیگر تقسیم می‌شوند [9]. پلیمر یک ماکرومولکول آلی است که از ترکیب مولکول‌های منفرد به نام مونومر تشکیل شده است [10]. در ابتدا بیشتر با اهداف کشاورزی از جمله کاهش نفوذپذیری و افزایش پایداری خاک استفاده شد [11] و [12] ولی به تدریج در مهندسی عمران نیز گسترش یافت و اخیرا تأثیر این مواد در زمینه‌های متنوعی مانند کاهش فرسایش و افزایش پایداری بستر راه و فرودگاه، مخازن دفن زباله و افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری (qu) و C.B.R خاک رسی، بررسی و مفید ارزیابی شده است [13] و [14] و [15] و [16] و[17]. اخیرا با جدی شدن مخاطرات زیست‌محیطی و توصیه‌های پیمان زیست‌محیطی کیوتو، روش‌های نوین تثبیت از جمله تثبیت زیستی مطرح گردیده که استفاده از بیوپلیمرها یکی از شاخه‌های این روش می‌باشد [18] و [19]. بیوپلیمرها، پلیمرهای سنتز شده توسط موجودات زنده و در واقع بیومولکول-های پلیمری هستند [20] که عمدتا در صنایع پزشکی و مکمل-های غذایی استفاده می‌شوند [21]. در مهندسی عمران ابتدا به عنوان ماده آبگیر فوق روان کننده و کاهنده آب، در تهیه دوغاب سیمان استفاده شده [22] و اخیرا در مهندسی ژئوتکنیک با توجه به تأثیر مثبت آن در اتصال دانه‌ها و کاهش فرسایش و نفوذپذیری، برای تثبیت خاک مورد توجه قرار گرفته است [23]. استفاده از این مثبت‌ها به دلیل عدم نیاز به تجهیزات خاص و زمان کوتاه اختلاط، ساده و مقرون به صرفه بوده و در خاک رس مؤثرتر است [24] و [25].

آزمایش تعیین MR، زمان‌بر و گران است و بر اساس آیین-نامه آشتو می‌توان آن را از روابط معتبر همبستگی با سایرپارامترهای خاک مانند C.B.R و مقاومت فشاری تک‌محوری (qu) تخمین زد. البته اعتبار کاربرد این روابط برای هر موقعیت باید بررسی شود [26]. از سال ۱۹۶۰ روابط مستقیم خطی بین C.B.R وMR توسط هولکوم و فاستر و هوکلوم و کلامپ ارائه گردید که در ادامه توسط گریم و هال با ارائه رابطه نمایی اصلاح شد. مدل نمایی نیز توسط محققان مختلف در چند مرحله اصلاح شد. در سال ۱۹۸۵ اوزان با اضافه کردن یک عدد ثابت به روابط نمایی، مدل جدیدی را پیشنهاد داد که ضرایب آن در NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) تغییر یافت [26] و [27] و [28]. تحقیقات بر روی خاک تثبیت شده در این زمینه محدود می‌باشد. تامسون در سال ۱۹۶۶ یک مدل همبستگی MR با qu را برای خاک تثبیت شده با آهک ارائه کردکه کاربرد آن توسط آشتو توصیه شده است [1] که در ادامه به دلیل نتایج محافظه‌کارانه، توسط لیتل و همکاران [29] اصلاح شد. توهی و همکاران در سال ۲۰۱۳ نتایج محافظه‌کارانه مدل تامسون را در خاک رسی تثبیت شده با آهک و با در نظر گرفتن تأثیر حالت تنش گزارش کردند. در حالی که پارک و همکاران در سال ۲۰۱۴ با انجام آزمایش ستون تشدید، ضرایب مدل تامسون را برای خاک نخاله ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و فوم متخلخل محاسبه و دقت بالای مدل را در خاک مذکور نتیجه گرفتند.

در این تحقیق، خاک مورد مطالعه، رس بستر راه بوده و برای تثبیت شیمیایی و زیستی به ترتیب از پلیمر جامد نیکوفلاک و بیوپلیمر بتاگلوکان استفاده شده و با انجام آزمایش (آزمایش‌های مدول برجهندگی در آزمایشگاه مرکزی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی و سایر آزمایش‌ها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران دانشگاه تبریز انجام شده است)، تأثیر هر کدام بر qu و MR بررسی گردیده و طرح بهینه اجرایی بر اساس هر یک از این دو پارامتر پیشنهاد شده است. سپس دقت مدل همبستگی تامسون در خاک تثبیت شده با هر ماده و تأثیر حالت تنش در آن بررسی شده است.

مصالح

خاک

در این تحقیق از خاک بستر آزادراه آمل ـ ساری در استان

مازندران ایران استفاده شد. طبق نتایج آزمایش دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ، این خاک بر اساس سیستم متحد، رس با حد روانی بالا (CH) طبقه‌بندی گردید. در جدول (۱) نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM آمده است.

جدول ۱ نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک

نوع خاک	CH
LL (%)	۵۳
PL (%)	۲۲
PI (%)	۳۱
Gs	۲/۶۱
γ_{dmax} (g/cm^3)	۱/۶۱
ω_{opt} (%)	۱۹/۶

تثبیت شیمیایی

در تثبیت شیمیایی از پودر نیکوفلاک که یک ترکیب معدنی پلیمری است، به عنوان پلیمر جامد استفاده شد. هر واحد منومر در ساختار این پلیمر یک زنجیره طولانی داشته و از نوع شانه‌ای می‌باشد و معمولا به همراه سیمان برای تثبیت خاک و تقویت آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد [15] و [31]. در جدول (۲) اجزای تشکیل دهنده نیکوفلاک بر اساس اطلاعات تولید کننده و پس از کنترل مجدد آن در ایران (آزمایشگاه مرجع مرکزی دانشگاه علم و صنعت ایران) آمده است.

تثبیت زیستی

در تثبیت زیستی از محلول بتاگلوکان در آب مقطر به عنوان بیوپلیمر استفاده شد. بتاگلوکان‌ها، متشکل از منومرهای دی‌گلوکز و دارای پیوندهای گیلوساید بوده و در طبیعت در اشکال مختلف مثل سلول، سبوس، قارچ و باکتری یافت می‌شوند [19] و با ساختار شاخک‌دار و مارپیچی، پتانسیل بالایی جهت جذب و اتصال با مولکول‌ها از طریق پیوند هیدروژنی نشان می‌دهند [32]. پودر بتاگلوکان در شکل (۱) نشان داده شده است.

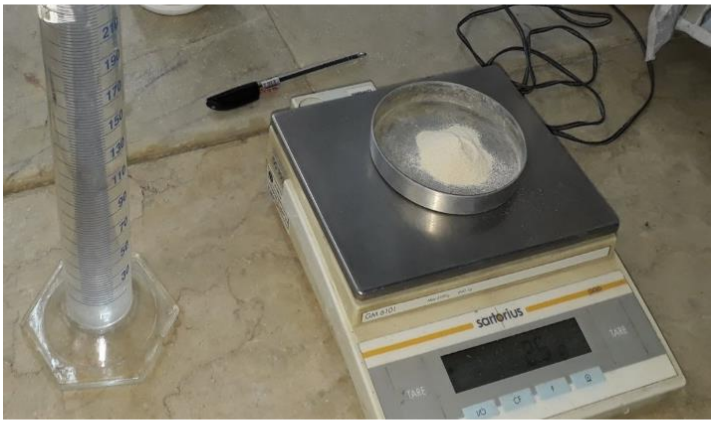
روش تثبیت آزمایشگاهی خاک برای نمونه‌گیری

تثبیت شیمیایی

ابتدا مثبت نیکوفلاک با مقادیر ۰/۳، ۰/۷ و ۱ درصد و سیمان پرتلند نوع دو (سیمان زنجان ـ تیپ ۲ ـ ۴۲۵) با مقدار ثابت ۳ درصد (همگی نسبت به وزن خاک خشک) به ترتیب به خاک خشک اضافه و به خوبی ترکیب شدند تا مخلوط یکنواخت به دست آید و سپس اختلاط با آب مقطر انجام شد (شکل ۲ ـ الف).

جدول ۲ اجزای نیکوفلاک

سایر	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	Na_2O	F	CaO	SiO_2
۵/۵۳	۰/۷۳	۱/۰۱	۱/۱۳	۲/۴۶	۲/۸۱	۴/۰۸	۳۷/۱۳	۴۵/۱۲



شکل ۱ پودر بتاگلوکان



(الف)



(ب)

شکل ۲ نحوه آماده سازی نمونه‌ها: الف) نیکوفلاک و سیمان، ب) بتاگلوکان

تثبیت زیستی

محلول بتاگلوکان پس از تهیه با غلظت‌های ۲ ، ۴ و ۸ گرم بر لیتر در آب مقطر و اطمینان از یکنواختی آن، به تدریج در چند مرحله به خاک خشک اضافه و عملیات اختلاط انجام شد (شکل ۲ ـ ب).

آزمایش‌های انجام شده

آزمایش تراکم (ASTMD698)

برای بررسی اثر تثبیت بر مشخصات تراکمی خاک مورد مطالعه، در تثبیت شیمیایی، پس از ترکیب خاک با سیمان و نیکوفلاک، در هر مرحله از آب مقطر استفاده شد. در تثبیت زیستی، محلول بتاگلوکان در هر مرحله به مقدار حساب شده به خاک خشک اضافه شده و آزمایش، گام به گام انجام شد. آزمایش تراکم برای هر نمونه با روش و دز مشخص، دو بار تکرار و در صورت کم بودن اختلاف نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (ASTMD2166)

برای سهولت خروج نمونه با حداقل دست‌خوردگی، از قالب دو تکه استفاده شد. نمونه‌ها پس از دوره‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بارگذاری گردیدند. برای بررسی تأثیر تثبیت برخصوصیات شکل‌پذیری خاک، علاوه بر q_u، مدول الاستیسیته سکانتی معادل ۵۰ درصد مقاومت ($E_{sec}50\%$) که به طور اختصار در این تحقیق با E نمایش داده می‌شود نیز تعیین شد. برای هر دز و دوره عمل‌آوری، دو نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و در صورت کم بودن اختلاف نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

آزمایش تعیین MR (AASHTOT307)

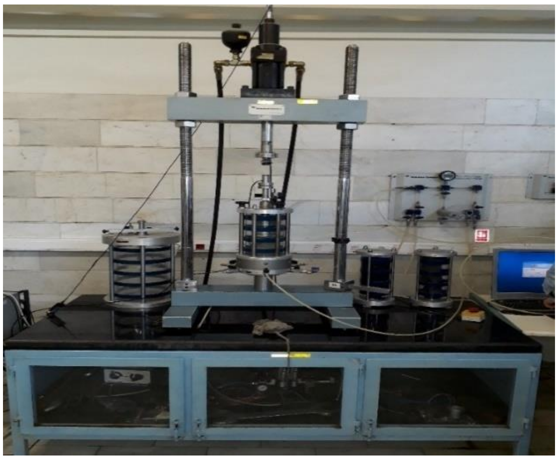
جهت تأمین داده‌های کافی برای بررسی روابط همبستگی، دوره-های عمل‌آوری برای هر دز از مثبت، ۱۴و ۲۸ روز در نظر گرفته شد (شکل ۳ ـ الف و ۳ ـ ب). طبق الگوی بارگذاری خاک بستر راه در استاندارد آشتو، نمونه پس از آماده‌سازی با هزار ضربه، تحت سه تنش همه جانبه با روند کاهشی قرار می‌گیرد. در هر کدام از آن‌ها با ۵ تنش سیکلی یا انحرافی با روند کاهشی به صورت جداگانه ۱۰۰ ضربه به نمونه وارد می‌گردد و میانگین مقادیر پنج ضربه آخر جهت محاسبه M_R در هر حالت تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزئیات آزمایش آمده است (شکل ۳ ـ ج).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳ (الف) ساخت و (ب) عمل‌آوری نمونه‌های آزمایش تعیین M_R و (ج) دستگاه آزمایش سه‌محوری دینامیکی (شرکت Wykham France)

جدول ۳ نتایج آزمایش تراکم

	خاک تثبیت نشده	تثبیت شیمیایی			تثبیت زیستی		
		۰٪/۳	۰٪/۷	۱٪	۲ g/lit	۴ g/lit	۸ g/lit
$\gamma_{d\ max}$ (g/cm^3)	۱/۶۱	۱/۵۵	۱/۵۳	۱/۵۷	۱/۵۱	۱/۵۲	۱/۵۳
ω_{opt} (%)	۱۹/۶	۲۱	۲۵	۲۳	۲۲	۲۵	۲۵/۵

تحلیل نتایج

آزمایش تراکم

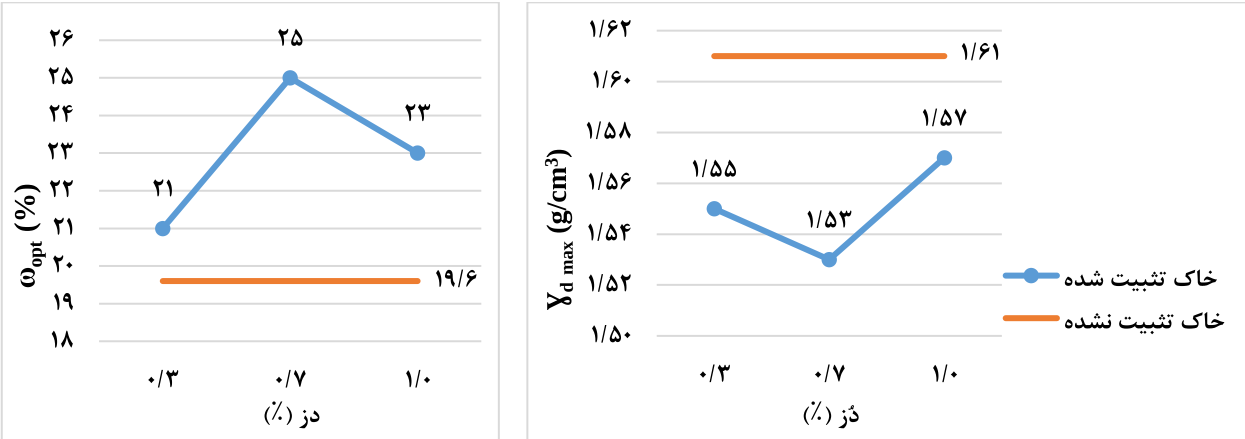
نتایج آزمایش تراکم در جدول (۳) آمده است.

تثبیت شیمیایی

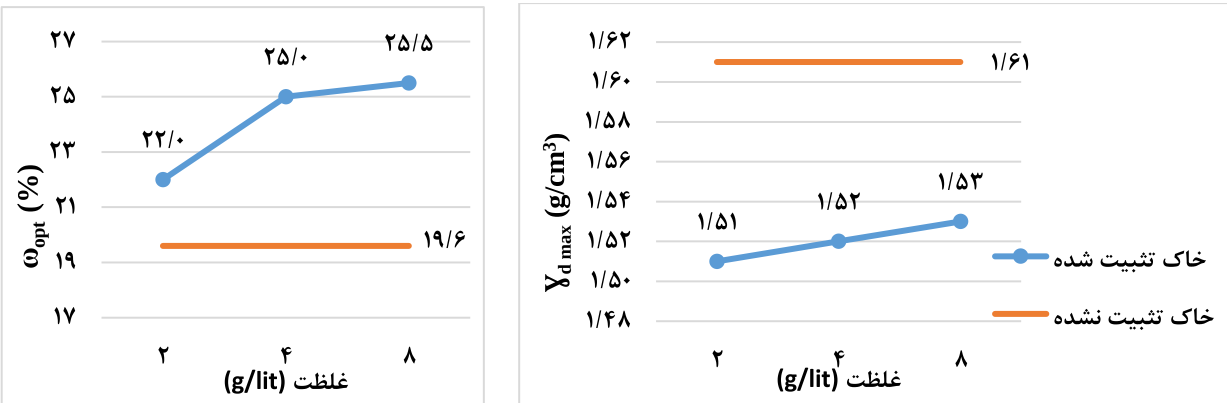
به طور کلی تثبیت خاک رس با مثبت‌های با پایه کلسیم مثل نیکوفلاک و سیمان به دلایلی از جمله تجمع ذرات در فضاهای بزرگ‌تر، وزن مخصوص کم مثبت و واکنش پوزولانی موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می‌شود [33] ولی با افزایش درصد نیکوفلاک به بالاترین مقدار، این روند متوقف شد و رطوبت بهینه تا حدودی کاهش یافت که این امر می‌تواند به علت افزایش تأثیر خصوصیات آب‌گریزی ذرات نیکوفلاک در این حالت باشد [34]. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش شیمیایی در شکل (۴) نشان داده شده است.

تثبیت زیستی

بتاگلوکان جاذب آب بوده و چگالی آن کمتر از خاک می‌باشد. بنابراین تجمع فیبرهای بتاگلوکان با دانسیته کم موجب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص حداکثر خاک شد. رطوبت بهینه با افزایش غلظت بتاگلوکان، مطابق نتایج تحقیقات منبع ۳۲، افزایش یافت. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش زیستی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴ نتایج آزمایش تراکم در تثبیت شیمیایی خاک (نیکوفلاک)



شکل ۵ نتایج آزمایش تراکم در تثبیت زیستی خاک (بتاگلوکان)

جدول ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (q_u) برای خاک تثبیت شده (MPa)

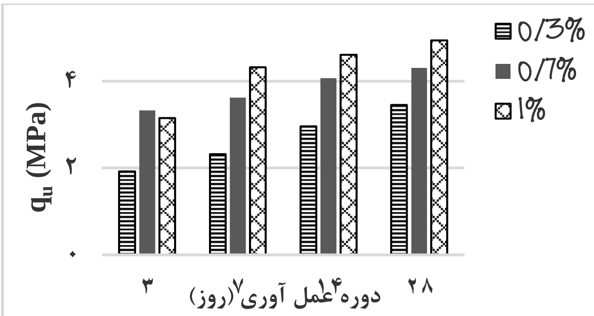
		سه روزه		هفت روزه		چهارده روزه		بیست و هشت روزه	
		E_{sec}	q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec}	q_u	E_{sec},	q_u
شیمیایی	٪ ۰/۳	۱۲۹/۱۷	۱/۹۲	۱۹۹/۲۷	۲/۳۲	۱۹۶/۶۷	۲/۹۶	۱۹۷/۶۲	۳/۴۳
	٪ ۰/۷	۱۴۴/۱۴	۳/۳۳	۱۴۴/۸	۳/۶۲	۱۴۹/۲۱	۴/۰۷	۱۶۰/۰۴	۴/۳۱
	٪ ۱	۱۳۱/۴۶	۳/۱۵	۲۰۲/۵۸	۴/۳۲	۲۰۰/۵۷	۴/۶۱	۲۰۲/۶	۴/۹۴
زیستی	۲ g/lit	۱۲۱/۸	۲/۷۳	۲۰۵/۶	۴/۵۶	۲۰۷/۵۸	۵/۰۵	۲۰۸/۴۲	۵/۴۸
	۴ g/lit	۱۸۲/۴۲	۳/۳۴	۲۴۴/۶۵	۵/۰۲	۲۵۴/۵	۵/۴۶	۲۵۰/۱	۵/۶
	۸ g/lit	۱۵۰/۴۱	۳/۵	۲۴۱/۰۵	۴/۳۲	۲۵۲/۰۴	۴/۲۱	۲۴۸/۸	۴/۲

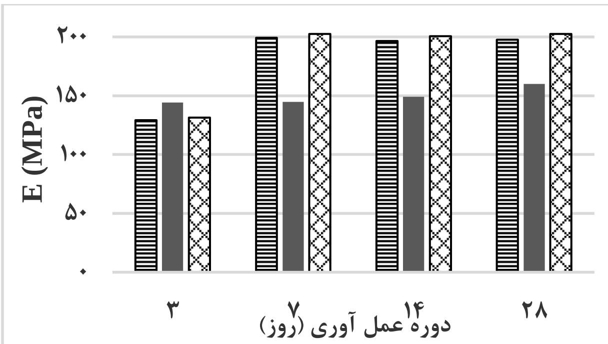
مقاومت فشاری تک‌محوری (q_u)

q_u و E خاک تثبیت نشده به ترتیب ۰/۵۷ و ۳۶/۲۸ مگاپاسکال حاصل شد. نتایج خاک تثبیت شده به روش شیمیایی و زیستی در جدول (۴) آمده است.

تثبیت شیمیایی

q_u نمونه‌ها با افزایش درصد نیکوفلاک افزایش یافت. این امر ناشی از تأثیر مستقیم نیکوفلاک در چسبندگی و همچنین تأثیر آن در بهبود عملکرد سیمان در تثبیت خاک می‌باشد. روند افزایش q_u و E تا ۷ روز سریع بود و بعد از آن کند شد. بالاترین مقاومت در میزان یک درصد و دوره عمل‌آوری ۲۸روزه به میزان ۴/۹۴ مگاپاسکال حاصل شد. E در این حالت ۲۰۲/۶ مگاپاسکال است. از آنجا که در این میزان، q_u و E چهارده روزه و بیست و هشت روزه از نظر الزامات طراحی، تفاوت قابل توجهی ندارند برای صرفه‌جویی در زمان اجرای پروژه، بر اساس معیار q_u، میزان یک درصد مثبت و دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد. در نمودارهای شکل (۶) مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی بر حسب دوره عمل‌آوری و در درصدهای مختلف پلیمر مقایسه شده‌اند.

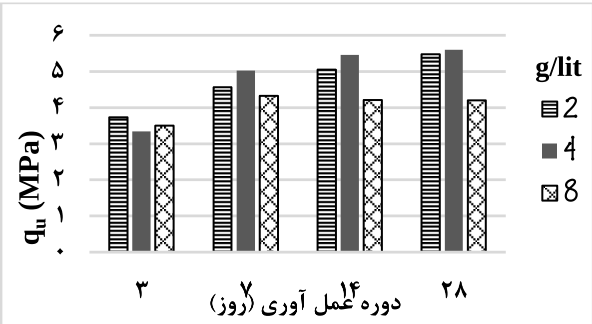


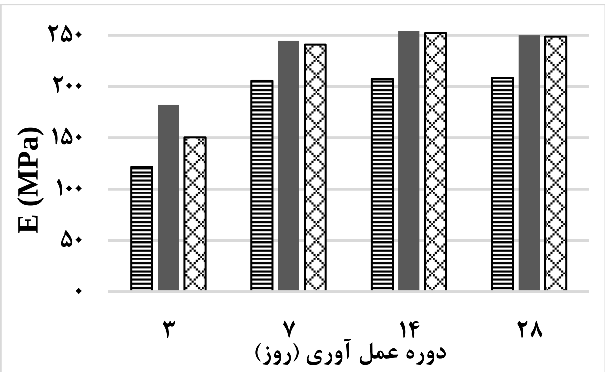


شکل ۶ مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی در درصدهای مختلف نیکوفلاک

تثبیت زیستی

q_u تا غلظت ۴ گرم بر لیتر افزایش یافته و پس از آن تا غلظت ۸ گرم بر لیتر به خصوص از دوره ۷ روز به بعد کاهش قابل توجهی یافت که با توجه به مشاهده فیبرهای ترکیب نشده دچار فرسایش در ساختار نمونه‌ها پس از آزمایش، می‌تواند ناشی از افزایش کلونی‌های فیبر ترکیب نشده بتاگلوکان با دانه‌های رس در غلظت ۸ گرم بر لیتر در ساختار خاک تثبیت شده، باشد. این روند با شدت کمتر در مورد E نیز دیده شد. بالاترین مقاومت در غلظت ۴ گرم بر لیتر و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به میزان ۵/۶ مگاپاسکال حاصل شد. E در این حالت ۲۵۰/۱ مگاپاسکال است. با توجه به نزدیکی نتایج و تأثیر دو عامل مقدار مثبت و دوره عمل‌آوری در اقتصاد پروژه، در صورت انتخاب هر یک از این دو عامل، بر اساس معیار q_u، غلظت ۲ گرم بر لیتر با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه یا غلظت ۴ گرم برلیتر با دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند. در نمودارهای شکل (۷) مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی بر حسب دوره عمل‌آوری و در غلظت‌های مختلف بیوپلیمر مقایسه شده‌اند.





شکل ۷ مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت زیستی در غلظت‌های مختلف محلول بتاگلوکان

آزمایش تعیین M_R

الگوی بارگذاری خاک بستر به همراه نتایج M_R خاک تثبیت نشده در جدول (۳) آمده است. حالت واقعی تنش سیکلی و محدود کننده (Confining Pressure) در بهره‌برداری، بین سکانس ۱ (S_1) و سکانس ۲ (S_2) آزمایش می‌باشد. بنابراین میانگین این دو مقدار به عنوان M_R طراحی در هر حالت در نظر گرفته شد.

جدول ۵ M_R خاک تثبیت نشده تحت الگوی بارگذاری بستر (AASHTO T307)

سکانس	فشار محدود	تنش سیکلی	M_R
شماره	kPa	kPa	MPa
۰	۴۱/۴	۲۴/۸	-
۱	۴۱/۴	۱۲/۴	۹۴/۳۹
۲		۲۴/۸	۹۱/۲۵
۳		۳۷/۳	۸۶/۹۲
۴		۴۹/۷	۸۶/۰۷
۵		۶۲	۸۳/۱۲
۶	۲۷/۶	۱۲/۴	۸۸/۰۶
۷		۲۴/۸	۸۴/۹۱
۸		۳۷/۳	۸۲/۹۰
۹		۴۹/۷	۷۹/۶۳
۱۰		۶۲	۷۷/۲۰
۱۱	۱۳/۸	۱۲/۴	۷۹/۸۳
۱۲		۲۴/۸	۷۰/۰۱
۱۳		۳۷/۳	۶۹/۸۸
۱۴		۴۹/۷	۷۰/۸۰
۱۵		۶۲	۷۰/۸۴

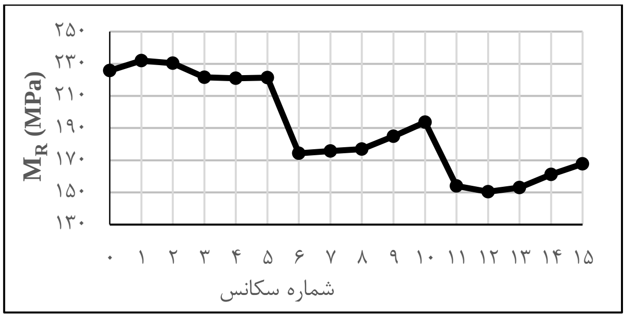
نتایج آزمایش تعیین M_R خاک تثبیت شده در نمودارهای شکل‌های (۸) تا (۱۳) نمایش داده شده است.

تثبیت شیمیایی

تثبیت شیمیایی با نیکوفلاک، M_R را افزایش داد. روند افزایشی با بالا رفتن درصد نیکوفلاک و تأثیر آن در بهبود عملکرد سیمان و اتصال دانه‌ها ادامه یافت. سرعت افزایش مقدار M_R در ۱۴ روز اول عمل‌آوری بالاتر است. بیشترین مقدار M_R طراحی در میزان افزودنی یک درصد و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به میزان ۳۵۸ مگاپاسکال حاصل شد. با توجه به نزدیک بودن نتایج و الزامات طراحی و اجرایی، مقدار افزودنی یک درصد با دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شد که مشابه حالت بهینه با معیار q_u می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۸ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۰/۳ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

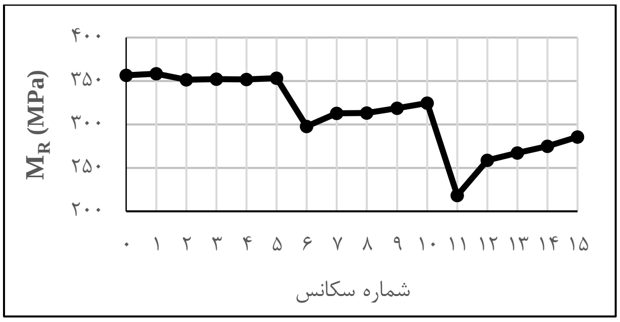


(الف)

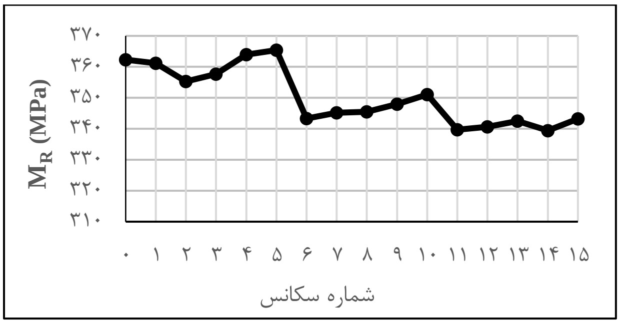


(ب)

شکل ۹ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۰/۷ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

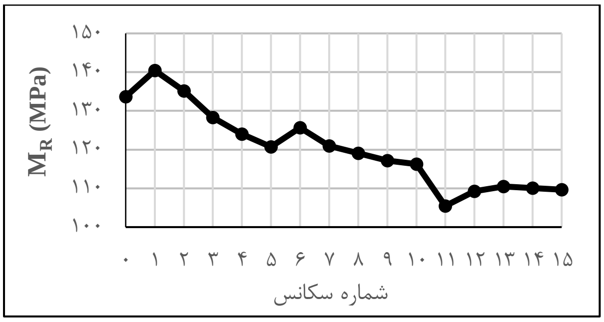


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با ۱ درصد نیکوفلاک در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

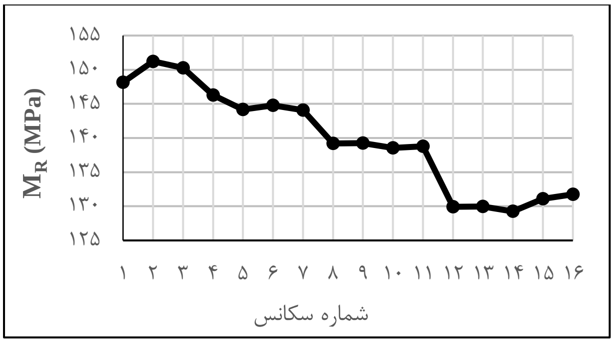


(الف)

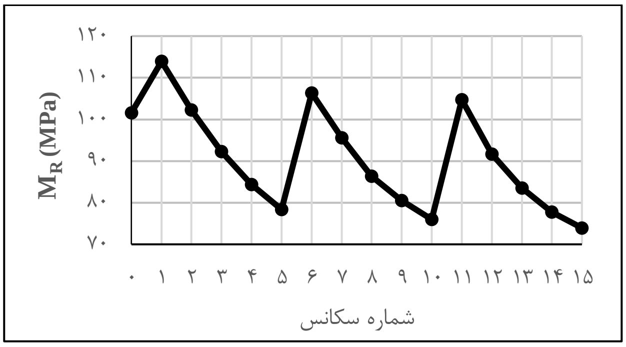


(ب)

شکل ۱۲ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۴ گرم برلیتر بتاگلوکان در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

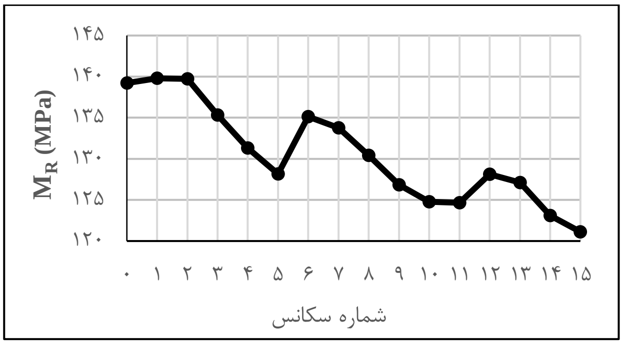


(الف)



(ب)

شکل ۱۱ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۲ گرم برلیتر بتاگلوکان در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه



(الف)

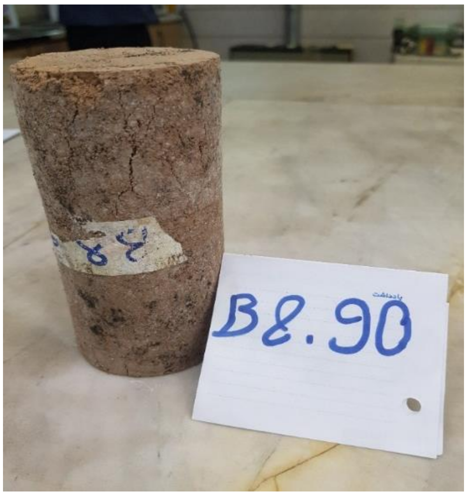


(ب)

شکل ۱۳ مدول برجهندگی خاک تثبیت شده با محلول ۸ گرم بر لیتر بتاگلوکان در دوره‌های عمل‌آوری (الف) ۱۴ روزه، (ب) ۲۸ روزه

تثبیت زیستی

مشابه روند آزمایش q_u، M_R تا غلظت ۴ گرم بر لیتر افزایش یافت و پس از آن تا غلظت ۸ گرم بر لیتر تغییر چندانی نداشت و حتی از ۱۴ روز به بعد کاهش یافت. به دلایلی که در بخش بیان شد، در غلظت ۸ گرم بر لیتر بر روی بدنه نمونه‌ها قارچ و فرسایش ملاحظه شد (شکل ۱۴). بیشترین مقدار M_R طراحی در غلظت ۴ گرم بر لیتر و دوره ۲۸ روزه به میزان ۱۵۴/۵ مگاپاسکال حاصل شد ولی با توجه به نزدیک بودن نتایج، الزامات طراحی و اجرایی و هزینه تهیه مثبت بیوپلیمر، غلظت ۲ گرم بر لیتر با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب می‌شوند.



شکل ۱۴ نمونه تثبیت شده به روش زیستی با غلظت ۸ گرم بر لیتر محلول بتاگلوکان

ارزیابی دقت مدل تامسون در تخمین M_R خاک مورد مطالعه

رابطه (۱) مدل تامسون را بیان می‌کند:

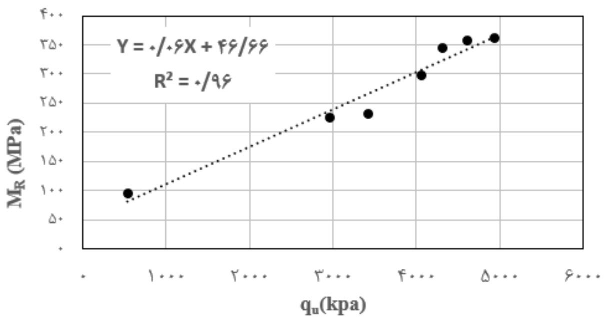
$$M_R = a \cdot q_u + b \quad (1)$$

که در آن a و b اعداد ثابت هستند.

در این مدل، M_R با یک رابطه خطی با q_u همبستگی دارد. برای ارزیابی این رابطه در حالت‌های مختلف تنش (سکانس‌های مختلف آزمایش M_R)، داده‌های دو دوره عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه در دزهای سه‌گانه مثبت نیوفلاک و بتاگلوکان آمده، در نظر گرفته شد. بنابراین برای تحلیل پراکندگی مدل تامسون در خاک تثبیت شده با هر یک از مثبت‌ها، برای هر حالت تنش در سکانس‌های ۱۵ گانه، ۷ داده موجود می‌باشد. به عنوان مثال نتیجه تحلیل داده‌های نیکوفلاک در S_1، بر اساس اطلاعات جدول (۶) در شکل (۱۵) آمده است. ردیف اول مربوط به نتایج خاک تثبیت نشده می‌باشد.

جدول ۶ مشخصات خاک تثبیت شده به روش شیمیایی جهت ارزیابی مدل تامسون در S1

دز	دوره عمل‌آوری	q_u	M_R
٪	روز	kPa	MPa
–	–	۵۴۰	۹۴/۳
۰/۳	۱۴	۲۹۵۷	۲۲۶
	۲۸	۳۴۳۰	۲۳۱/۹۶
۰/۷	۱۴	۴۰۶۹	۲۹۷/۷۸
	۲۸	۴۳۱۲	۳۴۴/۷۱
۱	۱۴	۴۶۰۶	۳۵۸/۳۷
	۲۸	۴۹۳۶	۳۶۱/۱

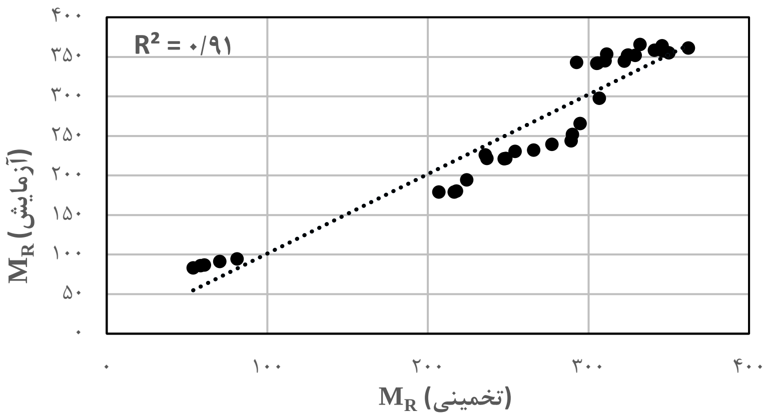


شکل ۱۵ ارزیابی دقت مدل تامسون در تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی در S1

سایر نتایج به همراه دقت همبستگی برای نتایج M_R طراحی حاصل از آزمایش تعریف شد، در جدول (۷) آمده است. داده‌های تحلیل نشان می‌دهد که به غیر از S11 در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، دقیق‌ترین برازش در هر تنش همه‌جانبه، در کمترین تنش انحرافی ملاحظه می‌شود. بنابراین با افزایش تنش انحرافی از دقت مدل در تخمین M_R طراحی بر اساس q_u کاسته می‌شود. بر خلاف خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، مدل تامسون برای خاک تثبیت شده با بتا گلوکان از دقت کافی برخوردار نیست. دقت مدل در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک حساسیت بیشتری نسبت به تغییر تنش همه‌جانبه نشان می‌دهد و در محدوده S_1 تا S_5 که عمده‌ترین حالات واقعی تنش در راه‌های اصلی و بزرگراه‌ها را شامل می‌شود بالاترین دقت را دارد. در شکل (۱۶) نتایج M_R حاصل از آزمایش و مدل تامسون خاک تثبیت شده به روش شیمیایی، در این محدوده مقایسه شده‌اند.

جدول ۷ دقت مدل تامسون (R^2) در تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی و زیستی

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
شیمیایی	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۵
	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	M_R طراحی
	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۹۵
زیستی	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۳	۰/۵۹	۰/۴۵	۰/۳۹
	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	M_R طراحی
	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۶	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۵۵



شکل ۱۶ مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و تخمینی M_R (مدل تامسون) خاک تثبیت شده به روش شیمیایی (نیکوفلاک) در محدوده S1 تا S5

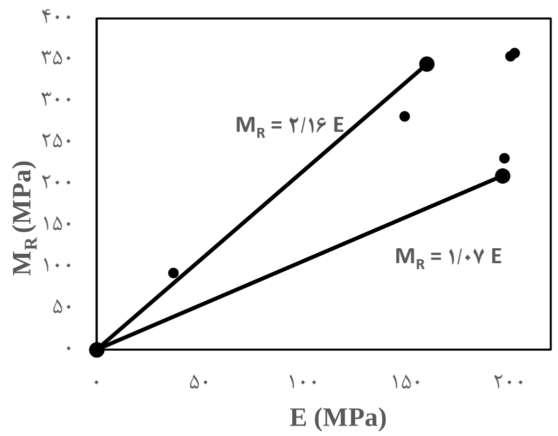
جدول ۸ دقت رابطه خطی همبستگی M_R و E در حالت‌های مختلف تنش

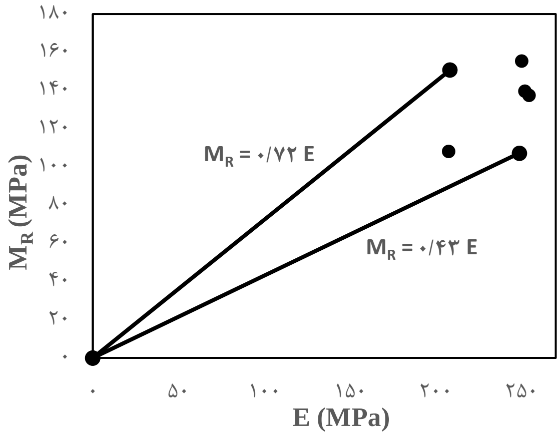
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
شیمیایی	۰/۵۴	۰/۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴	۰/۳۹
	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	M_R طراحی
	۰/۴	۰/۴	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۵۲
زیستی	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
	۰/۴۵	۰/۳۶	۰/۳	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۳۲
	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	M_R طراحی
	۰/۳	۰/۲۸	۰/۵۳	۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۴۱

ارزیابی دقت همبستگی بین M_R و E در خاک مورد مطالعه

با وجود ماهیت مشابه، همبستگی بین M_R و E در منابع و تحقیقات معتبر بررسی نشده ولی با توجه به وجود روابط معتبر همبستگی بین q_u و E برای خاک تثبیت شده لایه‌های روسازی [1] و با در نظر گرفتن مدل خطی رابطه (۱)، همبستگی بین این دو پارامتر با توجه به نتایج آزمایش‌ها به روشی مشابه تحلیل گردید که نتایج آن در جدول (۸) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تخمین M_R با E در خاک مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد.

با تحلیل پراکندگی داده‌ها طبق شکل (۱۷) در کارهای با اهمیت کم می‌توان بازه‌ای برای تخمین M_R خاک تثبیت شده با نیکوفلاک و بتاگلوکان با تعیین E خاک در نظر گرفت که دامنه بازه در بتاگلوکان کمتر از نیکوفلاک می‌باشد.





شکل ۱۷ بازه تخمین M_R خاک تثبیت شده به روش شیمیایی (نیکوفلاک) و زیستی (بتاگلوکان) با E در کارهای با اهمیت کم

نتیجه‌گیری

تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس ضعیف بستر، جهت اجتناب از جابه‌جایی و جایگزینی با استفاده از پلیمر نیکوفلاک و بیوپلیمر بتاگلوکان قابل انجام است. از تحقیقات انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

۱. تثبیت شیمیایی و زیستی خاک رس باعث کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه می‌شود که این امر در تثبیت شیمیایی بیشتر به دلیل واکنش‌های پوزولانی و در تثبیت زیستی به دلیل تجمع فیبرهای سبک در ساختار خاک می‌باشد. در تثبیت شیمیایی با افزایش وزن نیکوفلاک به ۱ درصد، رطوبت بهینه به دلیل تأثیر خصوصیات آب‌گریزی پلیمر، مجددا کاهش پیدا کرده و وزن مخصوص حداکثر افزایش می‌یابد.

۲. نیکوفلاک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را افزایش می‌دهد که روند آن در ۷ روز اول سریع است بعد از آن کند می‌شود. در تثبیت زیستی با بتاگلوکان، بهترین نتایج در غلظت ۴ گرم بر لیتر به دست آمده و در غلظت ۸ گرم بر لیتر، شاخص‌های مقاومتی و سختی خاک به خصوص از دوره ۷ روز به بعد به دلیل افزایش کلونی‌های فیبر ترکیب نشده با دانه‌های رس که بعضا به صورت قارچ و فرسایش در بدنه این نمونه‌ها قابل مشاهده هست، کاهش می‌یابد.

۳. برخلاف نتایج نزدیک در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، نیکوفلاک M_R خاک را بیش از بتاگلوکان افزایش می‌دهد که سرعت افزایش آن در هر دو مثبت در دوره ابتدایی عمل‌آوری (۱۴ روزه) بیشتر است و بعد از آن کند می‌شود. در غلظت ۸ گرم بر لیتر بتاگلوکان، به خصوص از دوره ۱۴ روز به بعد، M_R خاک کاهش می‌یابد.

۴. مدل تامسون برای تخمین M_R خاک تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب است و برای بتاگلوکان از دقت کافی برخوردار نیست. در خاک تثبیت شده با نیکوفلاک، بالاترین دقت مدل در محدوده S_1 تا S_5 که محدوده حالت تنش بهره‌برداری اغلب راه‌های اصلی و بزرگراه‌ها است، به دست آمد. بنابراین استفاده از این مدل برای تخمین M_R خاک رس تثبیت شده با نیکوفلاک مناسب می‌باشد.

۵. تخمین M_R خاک تثبیت شده با استفاده از مدل خطی رابطه همبستگی با E، نتایج دقیقی ندارد ولی در کارهای با اهمیت کم می‌توان یک بازه بر اساس این مدل به کار برد که استفاده از آن در خاک تثبیت شده با بتاگلوکان مناسب‌تر است.

۶. با توجه به نتایج به دست آمده، در صورت اولویت مزیت‌های اجرایی (زمان و هزینه)، تثبیت شیمیایی با نیکوفلاک و در صورت اولویت مزیت‌های زیست‌محیطی، تثبیت زیستی با بیوپلیمر مناسب می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از همکاری مدیران و متخصصان محترم آزمایشگاه مرکزی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی، به ویژه آقایان مهندس علی محمد اسمعیلی و مهندس حبیب جولانی و سرکار خانم مهندس شهربانو مقدسی، نهایت قدردانی به عمل می‌آید.

فهرست علائم

مقاومت فشاری تک‌محوری، kg/cm^2	q_u

مدول الاستیسیته سکانتی ۵۰٪، kg/cm^2	E
رس با حد روانی بالا	CH
حدود اتربرگ، %	LL، PL و PI
چگالی جامد دانه‌های خاک	Gs
رطوبت بهینه، ٪	ω_{opt}
وزن مخصوص حداکثر، g/cm^3	$\gamma_{d\ max}$
سکانس n ام	S_n
دقت تحلیل پراکندگی (رگراسیون)	R^2

سپاسگزاری

مراجع

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice*, 2008.

[2] A.Yousefi, W.M. Hasan, A. Saghayi, P. Ayar, M. Ameri, "Evaluation of mechanical properties of asphalt mixtures containing anti-stripping additives of GRIPPER® L, TeraGrip and WETMUL-95," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 31-34, 2021. (In Persian) https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.72939.1070

[3] M.J. Qazizadeh, A. Kavussi, A.A. Sadeghi, H. Farhad, "Development of Fatigue Predictive Models for Asphalt Concrete Mixes Containing Electric Arc Furnace Steel Slag Based on Fracture Energy Concept," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 17-34, 2019. (In Prsian) https://doi.org/10.22067/civil.v32i2.66310

[4] M. Arm, "Variation in deformation properties of processed MSWI bottom ash: results from triaxial tests," *Waste Management*, vol. 24, no. 10, pp. 1035-1042, 2019. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.07.013

[5] E.O. Tastan, T.B. Edil, C.H. Benson, A.H. Aydilek, "Stabilization of organic soils with fly ash," *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 137, no. 9, pp. 819-833, 2011. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502

[6] A. Ardah, Q. Chen, M. Abu-Farsakh, "Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements," *Transportation Geotechnics*, vol. 11, pp. 107-119, 2017. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.05.002

[7] S. Bhuvaneshwari, R. Robinson, S. Gandhi, "Resilient modulus of lime treated expansive soil," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol.37, no. 1, pp. 305-315, 2019. https://doi.org/10.1007/s10706-018-0610-z

[8] N. Pishvaei, M.J. Sharahi, M. Amelsakhi, "Laboratory Investigating into the Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol 14, no. 1, pp. 85-96, 2023. (In Prsian) https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.74674.1112

[9] P. Kolay, A. Pant, V. Puri, S. Kumar, "Effect of Liquid Polymer Stabilizer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soil," *In Indian Geotechnical Conference*, 2016, pp. 15-17.

[10] G.H. Hamdi, "Evaluation the Effect of Polyvinyl Chloride on Moisture Sensitivity of HMAt," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, 2019. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v32i2.65335

[11] W. Miller, R. Willis, G. Levy, "Aggregate stabilization in kaolinitic soils by low rates of anionic polyacrylamide," *Soil use and management*, vol. 14, no. 2, pp. 101-105, 1998. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1998.tb00623.x

[12] T. Zhang, Y. Deng, H. Lan, F. Zhang, H. Zhang, C. Wang, Y. Tan, R. Yu, "Experimental Investigation of the

Compactability and Cracking Behavior of Polyacrylamide-Treated Saline Soil in Gansu Province," *China Polymers*, vol. 11, no. 1, p. 90, 2019. https://doi.org/10.3390/polym11010090

[13] W.J. Orts, A. Roa-Espinosa, R.E. Sojka, G.M. Glenn, S.H. Imam, K. Erlacher, J.S. Pedersen, "Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 58-66, 2007. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(58)

[14] D. Yongfeng, L. Songyu, H. Jian'an, L. Kan, D. Yanjun, J. Fei, "Strength and permeability of cemented soil with PAM," *Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*, 2012, pp. 1800-1807. https://doi.org/10.1061/9780784412350.0155

[15] A.M. Gridchin, S. Zlotykh, "PMC Nicoflok research effect as mechanochemical activator on the cement characterestic used," *Bulletin of Belgorod State Technological University Named. After V. G. Shukhov*, vol. 5, no. 8, 2018. https://doi.org/10.12737/article_5af5a72640c9f7.36216170

[16] I. Gavrilina, A. Bondar, "Analysis of using nicoflok polymer-mineral additive for replacing stone materials as road bases," *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing*, vol. 451, 2018. pp. 26-28. https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012086

[17] P. Kolay, B. Dhakal, "Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, pp. 2479-2491, 2020. doi.org/10.1007/s10706-019-01163-x

[18] K. Chiet, K. Kassim, K. Chen, U. Martula, C. Yah, A. Arefnia, Effect of Reagents Concentration on Biocementation of Tropical Residual Soil," *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing*, vol. 136, 2015, pp. 27-29. https://doi.org/10.1088/1757-899X/136/1/012030

[19] I. Chang, J. Im, G.-C. Cho, "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering," *Sustainability*, vol. 8, no. 3, p. 251, 2016. https://doi.org/10.3390/su8030251

[20] R.S. Dassanayake, S. Acharya, N. Abidi, "Biopolymer-based materials from polysaccharides: Properties, processing, characterization and sorption applications," *Advanced Sorption Process Applications*, ch. 1, 2018. 10.5772/intechopen.80898

[21] K. Van de Velde, P. Kiekens, "Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications," *Polymer testing*, vol. 21, no. 4, pp. 433-442, 2002. https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00107-6

[22] K. Khayat, A. Yahia, "Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout," *ACI Materials Journal*, vol. 94, no. 5, pp. 365-372, 1997.

[23] D.M. Cole, D.B. Ringelberg, C.M. Reynolds, "Small-scale mechanical properties of biopolymers," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, vol. 138, no. 9, pp. 1063-1074, 2012. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000680

[24] W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, "Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review," *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 118-136, 2010. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006

[25] Z.B. Ebrahimialavijeh Bahareh, Mokhtari Maryam, "Investigation of the effect of Polypropylene Fibers on compression strength and tensile strength of organic soil stabilized with lime and Xanthan-Gum biopolymer," *AUT Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 1853-1870, 2021. (In Persian) https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17185.6490

[26] A. Dione, M. Fall, Y. Berthaud, F. Benboudjama, A. Michou, "Implementation of Resilient Modulus‑CBR relationship in Mechanistic Pavement Design," *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, vol. 1, no. 2, pp. 65-71, 2014.

[27] V.E. UZ, M. Saltan, İ. GÖKALP, "Comparison of DCP, CBR, and RLT test results for granular pavement materials and subgrade with structural perspective," *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2015.

[28] B.R. Christopher, C.W. Schwartz, R. Boudreaux, R.R. Berg, *Geotechnical aspects of pavements Reference Manual*, United States. Federal Highway Administration, 2006.

[29] N. Toohey, M. Mooney, R. Bearce, "Relationship between resilient modulus and unconfined compressive strength for lime-stabilized soils," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 139, no. 11, pp. 1982-1985, 2013. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000925

[30] D.-W. Park, H.V. Vo, Y. Lim, "Recycling of Dredged Soil Waste Using Air-foam Stabilization Method as Highway Construction Material," *Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure*, 2014. https://doi.org/10.1061/9780784478455.006

[31] A.V. Khruleva, G.I. Sobko, Application of Innovative Technologies in the Construction of Highways by the Stabilized Soils (Experience of the Nizhny Novgorod Region), *Main Direction of Highway-Nizhny Novagorod Region-Russian*, 2012. Available: http://www.guad.nnov.ru/?id=2936

[32] I. Chang, G.-C. Cho, "Geotechnical behavior of a beta-1, 3/1, 6-glucan biopolymer-treated residual soil," *Geomechanics and Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 633-647, 2014. https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.6.633

[33] J.R. Prusinski, S. Bhattacharja, "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils," *Transportation research record*, vol. 1652, no. 1, pp. 215-227, 1999. https://doi.org/10.3141/1652-28

[34] F. Rezaie Moghaddam, B. Jafari Nader, T. Rezaie Moghaddam, "Laboratory Investigation of the Effect of " NICOFLOK" Polymer on the Compressive and Tensile Strength of Desert and Coastal Sand at the pavement Layers," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 733-748, 2021. https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16612.6288